

文章编号: 1000-7598 (2010) 05-1569-05

公路桥超长群桩的有效桩长研究

王 成

(重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074)

摘 要: 针对公路桥梁超长群桩的有效桩长问题, 对国内公路桥梁桩基的荷载状况进行统计分析, 得出桩顶应力主要分布在 6~21 MPa 范围。进行了长径比为 96 的桩间距分别为 $3D$ 、 $4.5D$ 和 $6D$ 的 3 组不同群桩的超长群桩模型试验, 得到 3 种不同桩间距的超长群桩中单桩轴力随着不同荷载的分布图, 按照桩身轴力趋于 0 的桩截面的深度确定有效桩长, 并利用指数函数关系分别拟合了 3 种不同桩间距的桩顶应力与有效桩长之间的关系。根据竖向荷载作用下群桩模型试验与实际原型之间的相似关系, 确定公路桥超长群桩与荷载对应的有效桩长取值范围, 研究了超长群桩的有效桩长与桩间距之间的关系, 并对桥梁桩基有效桩长的取值与桩间距提出了建议。

关 键 词: 公路桥; 桩顶应力; 超长群桩; 有效桩长; 模型试验

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Study of effective length of super-long pile group in highway bridges

WANG Cheng

(School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In light of the effective length problem of super-long pile of the pile group in highway bridges, the loading status of pile foundation for highway bridges in China is statistically analyzed. The resulting stress distribution range at the top of the pile is basically 6-21 MPa. The model tests of the super long pile groups have been carried out, in which the length-diameter ratio is 96 and the pile spans are respectively $3D$, $4.5D$ and $6D$. The axial force distributions of different loadings in the super-long pile group with different pile spans are obtained. According to the depth of pile section for axial forces of the pile tending to zero, the effective length of pile is determined. The relations between the pile top stress and the effective length of pile for three different pile spans are drawn up by utilizing the exponential functions. By exploring the resemble principles about model test of pile groups under the vertical loads, the effective length of piles corresponding to pile top loading of the super long pile group in highway bridges are yielded. Also the relations between the effective lengths of piles in the super long pile group and the pile spans are researched. At last, some suggestions are proposed for the concrete choice data of the pile spans and effective lengths of super-long piles.

Key words: highway bridge; stress of pile top; super-long pile group; effective length of pile; model test.

1 前 言

近年来随着交通建设的发展, 大跨径桥梁与日俱增, 大直径超长桩的使用也日益增多, 而超长桩的使用主要以群桩形式出现, 例如, 苏通长江公路大桥、润扬长江公路大桥等, 主墩桩基长度已越百米。自 1999 年以来, 随着国家各级管理部门对建设工程质量和耐久性的强调和若干相应政策法规的出台及实施, 在工程建设中普遍存在一种现象, 不少工程技术人员在设计或施工中为了结构的安全, 一味强调保守, 使得桩基的长度越来越长, 有些甚至

远远超过了其需要的有效桩长, 势必造成建设资金的浪费。此外, 由于超长群桩的研究还不成熟, 工程建设通常仍套用一般长桩或中长桩的桩间距似不合适, 桩越长会给桩基施工带来困难, 而且桩基施工对桩间土状态也会造成不利影响。合理确定超长群桩的有效桩长是值得研究的重要课题。

超长单桩的有效桩长问题研究已取得了一些较好的成果^[1-10], 有效桩长确定方法归纳起来主要有极限承载力控制法、桩顶沉降控制法及基桩刚度控制法等几种。超长群桩也存在有效桩长问题, 其定义也类似于单桩有效桩长。不过, 确定群桩有效桩

长比确定单桩有效桩长更复杂,除了受单桩有效桩长因素的影响外,还受桩距、群桩效应,桩-土-承台共同作用等因素的影响。已有研究成果表明^[1-10],对超长桩的有效桩长影响最为敏感的因素是桩顶荷载大小,本文从分析公路桥梁桩基的荷载分布情况入手,研究全国公路桥梁桩基有效桩长的大致范围问题。

2 我国公路桥梁桩基的荷载分析

超长桩的有效桩长主要与桩顶荷载大小、桩周土体性质、桩身几何特征以及桩土界面等密切相关,其中桩顶荷载大小是确定有效桩长非常重要的因素。20 世纪 80 年代以来,我国设计的公路桥梁的荷载等级一般采用汽车-20 级和汽车-超 20 级,2004 年新的荷载标准统一采用公路-II 级和公路-I 级,和以前的荷载等级大致相当。值得注意的是,大量公路桥梁建设经验表明:跨径越大,桥墩越粗,对应承台下的桩数就越多,反之越少。假如地质情况相同,桩径、桩长和桩间距也相同,那么公路桥梁的每根桩顶上的荷载应趋于某一个定值或一个比较确定的范围。

按照现行《公路桥涵地基与基础设计规范》^[11]关于单桩极限荷载的要求,有

$$[P] = \frac{1}{2}(Ul\tau_p + A\sigma_R) \quad (1)$$

式中: U 为桩的周长; l 为桩的长度; τ_p 为桩侧土的平均极限摩阻力; A 为桩底截面积; σ_R 为桩尖土的极限承载力。对于超长桩而言,式(1)并不一定正确,但表明单桩竖向极限承载力为容许承载力的 2 倍,另外,考虑到复杂的荷载组合,例如,混凝土收缩与徐变、水浮力荷载效应及偶然荷载等,容许承载力可提高 25%,则单桩竖向容许承载力为

$$[P] = \frac{1}{2 \times 1.25}(Ul\tau_p + A\sigma_R) \quad (2)$$

因此,单桩竖向极限承载力为容许承载力的 2.5 倍。为了具有一定代表性,搜集了我国北方、南方、东南以及西南等地区的 32 座桥梁 53 组群桩基础的设计参数,并对这些参数进行统计分析^[11],跨径分布范围在 20~165 m,桩径为 1.0~2.5 m,单桩桩顶设计竖向荷载为 980~22 325 kN(假设为容许荷载),其中大部分为 20~50 m 跨径桥梁的桩基。由式(2)可知,单桩竖向极限荷载分布范围为 2 450~55 813 kN,荷载范围较大,为了消除桩径对荷载范围的影响,可用桩顶应力表示。与该极限荷载对应的桩顶应力的变化范围为 3.5~21.5 MPa。

图 1 为单桩的桩顶应力与对应桩群数(桥墩数)的分布图,从图中可以看出,桩群数(桥墩数)与桩顶应力基本呈正态分布,单桩桩顶应力主要集中在 6~21 MPa 范围内。

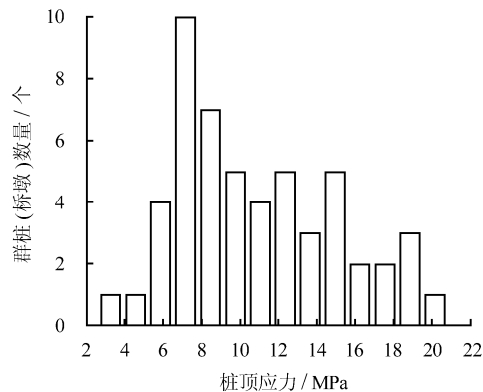


图 1 桩顶应力对应的桩群数分布图

Fig.1 Bar chart of pile group numbers corresponding to pile top stress

3 超长群桩的室内模型试验

3.1 超长群桩模型试验概况

本次室内模型试验在重庆交通大学交通行业山区桥梁与结构重点实验室进行。首先,确定超长群桩模型的几何尺寸相似比例为 1:40,在试验大厅采用钢筋混凝土建造了一个长 4 m、宽 3 m、高 5 m 的大型模型试验箱,图 2 为桩的平面布置图。模型桩长 480 cm,采用外径 5 cm、内径 4.5 cm 的有机玻璃管制作,有机玻璃管外侧表面做粗糙化处理。3 组群桩的桩数均为 2×3,桩距 $S_a = 3.0D$ 、 $4.5D$ 和 $6.0D$ (D 为桩的直径),模型桩的长径比为 96。桩底留土层厚度为 20 cm,3 组群桩用定位模板定位后分层夯实黏性回填土,夯实完成后的桩周土物理力学参数为表 1 所列,有机玻璃桩材的弹性模量为 2.9 GPa。

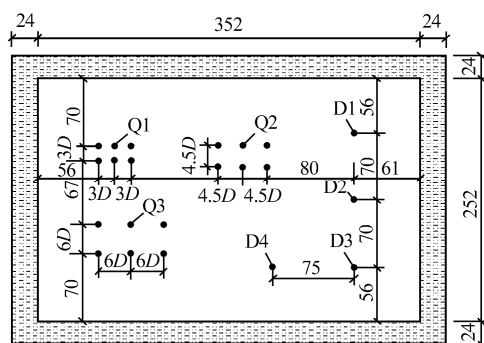


图 2 模型桩布置图(单位: cm)

Fig.2 Arrangement plan of the model pile (unit: cm)

表1 桩周土物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the soil

湿密度 /(g/cm ³)	含水率 /%	孔隙比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	压缩模量 /MPa
2.06	17.3	0.537	28.6	19.0	6.0

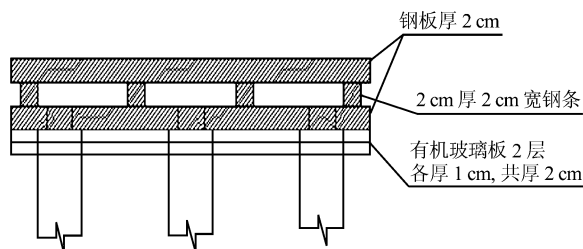


图3 群桩模型的承台

Fig.3 Cap of the model pile groups

桥梁的承台一般是刚性的, 模型刚性承台是这样制作的, 用 2 cm 厚的有机玻璃板成孔后固结桩顶, 其上叠放一块预先成孔的 2 cm 厚钢板, 钢板成孔的目的是引出桩身应变测试线, 在成孔钢板上固定 4 根矩形截面钢条, 钢条上固定一块无孔钢板用于加载, 测试线从钢条之间引出后接入数据采集设备。

加载千斤顶的反力装置利用实验室内的大型刚性反力架, 它可调整其位置和高度, 使之可以任意位置实施加载。试验所采集的数据为桩身各截面应变、桩顶位移和桩底反力, 其中桩身应变数据采用 YE-2539 静态智能应变仪采集, 利用其配套软件将所采集数据存储于电脑, 可分析桩身应力及轴力和侧阻力。压力盒设置于各模型桩底, 以测量各桩底反力。承台顶位移采用对称设置 4 只百分表测读, 百分表用磁性表座固定在基准梁上, 群桩沉降取 4 个百分表读数的平均值。

3.2 模型试验的主要结果

本大型的模型试验得到了黏性土内 3 种不同桩间距的群桩荷载-沉降曲线, 3 种不同间距群桩中每根桩的轴力与荷载的关系图, 以及每根桩的桩侧阻力分布等。本文研究超长群桩的有效桩长问题, 在已知桩身轴力的情况下, 根据桩身轴力沿桩深的衰减确定有效桩长也是常用的方法。如图 4 所示为桩间距为 3D 群桩在各级荷载 P 作用下 4 号单桩的轴力分布图, 将桩身轴力沿桩身衰减至桩顶荷载的 5% 所对应的深度的桩长定为有效桩长, 根据各桩轴力图容易确定出超长群桩各桩的有效桩长。本次荷载试验在承台顶施加的各级荷载下对应的有效桩长, 见表 2。由于刚性承台在轴心荷载下各桩均分

总荷载, 因此, 一组群桩只列出一根桩的有效桩长与荷载的对应关系。

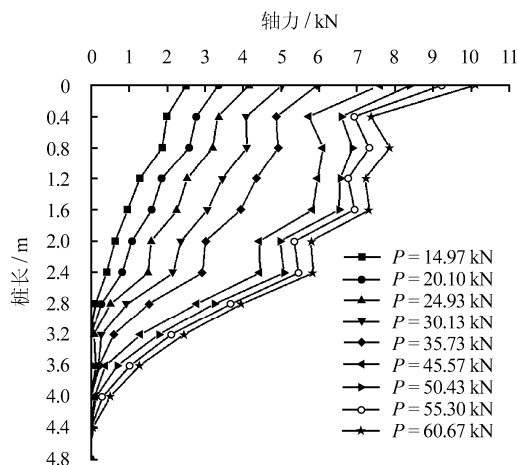


图4 3D 群桩 4 号桩的桩身轴力分布图

Fig.4 The axial force of pile No.4 in the 3D pile group

表2 3 组群桩的有效桩长试验数据

Table 2 Test data of effective length of three pile groups

3D-4		4.5D-1		6D-3	
桩顶应力 /MPa	有效桩长 /m	桩顶应力 /MPa	有效桩长 /m	桩顶应力 /MPa	有效桩长 /m
2.41	2.00	2.41	1.90	4.69	1.85
6.70	2.78	6.60	2.61	9.11	2.64
11.15	3.08	12.15	3.22	15.71	3.04
15.98	3.52	17.84	3.54	23.83	3.89
22.54	3.80	23.19	3.88		
27.10	4.00				

表 2 中 3D 群桩中的 4 号桩的桩顶应力 σ 与有效桩长 L_e 有 6 组对应关系, 为了便于计算, 将这 6 组数据进行指数曲线拟合, 得到它们之间的关系为式 (3), 如图 5 为拟合前后的曲线变化图。

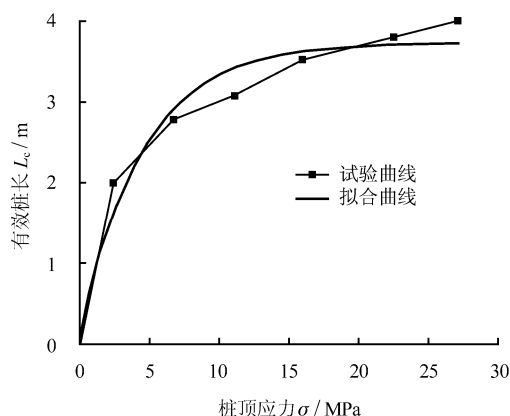


图5 3D 群桩中 4 号桩的桩顶应力与有效桩长关系曲线

Fig.5 The curves of stress at the top of pile No.4 and effective length in 3D pile group

$$L_c = 3.73 - \frac{90.19}{1 + e^{\frac{\sigma + 14.25}{4.47}}}, \quad (3D \text{ 群桩}) \quad (3)$$

同理, 分别得到 4.5D、6D 桩间距群桩的有效桩长与桩顶荷载关系:

$$L_c = 3.65 - \frac{69.44}{1 + e^{\frac{\sigma + 12.9}{4.4}}}, \quad (4.5D \text{ 群桩}) \quad (4)$$

$$L_c = 3.92 - \frac{115.82}{1 + e^{\frac{\sigma + 28.02}{8.22}}}, \quad (6D \text{ 群桩}) \quad (5)$$

4 公路桥桩基有效桩长的取值范围研究

工程实践中, 各种跨径的桥梁由于上部结构恒载和活载的差异, 桥墩高度、群桩的根数及桩径等的不同, 使得群桩中各单桩的桩顶应力也不尽相同, 但对于公路桥梁而言应有一个确定的范围。如前所述, 作者对我国不同地区桥梁建设情况的不完全统计, 作用于桥梁桩基顶部的容许荷载基本上在 980~22 325 kN, 相应的单桩竖向极限荷载分布范围为 2 450~55 813 kN, 与该极限荷载对应的桩顶应力, 主要集中在 6~21 MPa 范围内。

根据群桩受竖向荷载作用下的模型与原型之间的相似关系, 由模型群桩的有效桩长与桩顶应力的关系式 (3)~(5) 求出模型超长桩的有效桩长。模型的几何相似比是 1: 40, 桩顶的应力相似比为模型桩与原型桩的弹性模量之比, 若原型桩为 C25 钢筋混凝土材料, 则二者弹性模量之比为 10 倍关系。因此, 原型桩的荷载范围 6~21 MPa 相似于模型桩的 0.6~2.1 MPa 荷载范围, 将该荷载范围下限 0.6 MPa 和上限 2.1 MPa 分别代入式 (3)~(5), 可得到模型桩的有效桩长, 而原型桩的有效桩长则为模型桩有效桩长的 40 倍, 如表 3 所列^[12]。

表 3 超长群桩有效桩长取值范围

Table 3 Range of effective length of super-long pile group

桩间距	桩顶应力下限 对应的有效桩长 /m	桩顶应力上限 对应的有效桩长 /m	备注
3.0D	0.60	1.47	模型桩
4.5D	0.56	1.43	
6.0D	0.46	1.01	
3.0D	24.00	58.80	原型桩
4.5D	22.40	57.20	
6.0D	18.40	40.40	

应当注意, 表 3 中所列有效桩长只与桩顶应力有关, 模型桩周土则是表 1 所列黏性土, 而对应的原型桩周土则可能是含砂量较高的土, 甚至是砂性土, 因为黏性土颗粒放大 40 倍后可能黏聚力会大大降低。研究认为, 桥梁桩基在含砂量较高的黏性土中有效桩长应在 60 m 以内, 这一结论也符合类似土层中的桥梁桩基实际情况。

5 有效桩长与群桩桩间距之间的关系

基于超长群桩室内模型试验的数据和相似关系, 得到表 3 所列出的桩间距与有效桩长数据, 可以看出, 当桩顶应力较小时, 有效桩长较短, 随着桩顶应力的增大, 有效桩长也随之增长 (见图 5); 随着桩距的增大, 群桩有效桩长有所减小, 有效桩长与桩间距的关系如图 6 所示。从图可以看出, 超长群桩有效桩长与群桩间距之间的关系不是线性关系, 也表明桩间距的减小体现出桩与桩之间相互作用加强的效应, 有效桩长也相应增加, 反之, 有效桩长相应减小, 为今后在含砂量较大的黏性土中超长群桩设计提供参考。

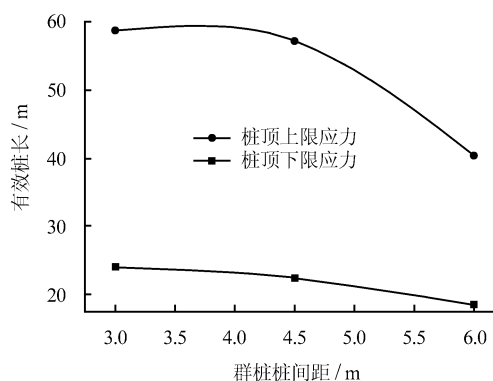


图 6 桩距与有效桩长关系曲线

Fig.6 Relationship between pile span and effective length of pile group

6 结 论

(1) 对我国不同省区的 32 座桥梁 53 组群桩基础的统计分析, 得到单桩的桩顶极限荷载分布范围为 2 450~55 813 kN, 相应的应力分布范围主要集中在 6~21 MPa 之间。

(2) 超长群桩有效桩长与桩顶应力呈非线性关系, 在 3 组不同桩间距的群桩试验数据基础上分别拟合得到了指数型的函数关系, 可以通过设计的容许桩顶应力估算有效桩长。

(3) 基于我国公路桥梁桩顶荷载情况, 在含砂量较高的砂性土层中的群桩有效桩长的取值范围大

约在 25~60 m 之间。

(4) 超长群桩有效桩长与群桩的桩间距之间的关系不是线性关系, 也表明群桩的桩间距的减小体现出桩与桩之间相互作用增强, 群桩的有效桩长也相应增加, 用模型试验结果分析表明, 群桩的桩间距从 3D 增大到 6D, 有效桩长最大值相应从 60 m 非线性减小到 40 m。

超长群桩有效桩长的影响因素复杂多变, 支持本文的模型试验数据只是一种土质条件下取得的, 对于全国各地复杂的地质条件和不同的施工工艺, 超长群桩的有效桩长问题还需进一步研究。

致谢: 本文模型试验得到了重庆交通大学教育部桥梁结构与材料工程中心的大力支持, 凌天清教授提出了有益的建议, 以及研究生刘春波、张凯、原磊、周淑芬、李颖、叶元芬和司文静等的辛勤工作和数据分析, 特表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 池跃君, 顾晓鲁. 大直径超长灌注桩承载性状的试验研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(8): 26—29.
CHI Yao-jun, GU Xiao-lu. Experimental research on bearing behavior of large diameter and super-long bored piles[J]. **Industrial Construction**, 2000, 30(8): 26—29.
- [2] 朱向荣, 方鹏飞, 黄洪勉. 深厚软基超长桩工作性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 76—79.
ZHU Xiang-rong, FANG Peng-fei, HUANG Hong-mian. Research on super-long pile in soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(1): 76—79.
- [3] 曾友金, 章为民, 王年香, 等. 按桩的割线刚度确定深厚覆盖土层中普通桩有效桩长[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 723—728.
ZENG You-jin, ZHANG Wei-min, WANG Nian-xiang, et al. Determination of effective length of a common pile in deep overlap soil layers with secant rigidity of pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 723—728.
- [4] 王春青, 贾明彦. 由 P - S 曲线确定摩擦桩单桩的有效桩长[J]. 西安科技学院学报, 2001, 21(1): 24—26.
WANG Chun-qin, JIA Ming-yan. Determining the valid length of friction pile from P - S curve[J]. **Journal of Xi'an University of Science & Technology**, 2001, 21(1): 24—26.
- [5] 舒翔, 黄雨. 基桩有效桩长的确定方法[J]. 工业建筑, 2001, 31(1): 72—74.
SHU Xiang, HUANG Yu. Determining method for effective length of foundation pile[J]. **Industrial Construction**, 2001, 31(1): 72—74.
- [6] 何开胜, 袁文明. 超长水泥土搅拌桩的承载力和临界桩长[J]. 工业建筑, 2000, 30(1): 26—30.
HE Kai-sheng, YUAN Wen-ming. Bearing capacity and critical length of super-long cement-mixing pile[J]. **Industrial Construction**, 2001, 30(1): 26—30.
- [7] 张忠苗, 辛公锋, 夏唐代. 深厚软土非嵌岩超长桩受力性状试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(4): 64—69.
ZHANG Zhong-miao, XIN Gong-feng, XIA Tang-dai. Test and research on unrock-socketed super-long pile in deep soft soil[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2004, 37(4): 64—69.
- [8] 贺武斌, 贾军刚, 白晓红, 等. 承台-群桩-土共同作用的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 710—715.
HE Wu-bin, JIA Jun-gang, BAI Xiao-hong, et al. The experimental study of cap-pile groups-soil interaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(6): 710—715.
- [9] 高广运, 王文东, 吴世明. 黄土中灌注桩竖向承载力试验分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 75—79.
GAO Guang-yun, WANG Wen-dong, WU Shi-ming. Test study on vertical bearing capacity of cast-in-place pile in loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(3): 75—79.
- [10] 谢涛, 袁文忠, 朱明. 竖向荷载下超大群桩受力变形分析[J]. 西南交通大学学报, 2002, 37(4): 377—381.
XIE Tao, YUAN Wen-zhong, ZHU Ming. The deformation behavior of super-large pile group under vertical load[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 2002, 37(4): 377—381.
- [11] 中交公路规划设计院有限公司. JTG D63—2007 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [12] 周淑芬. 超长群桩竖向承载力计算方法及参数取值研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2007.